



·激光物理·

单波长泵浦双光子吸收铷蒸汽激光器理论分析*

季艳慧^{1,2}, 何 洋¹, 劳国超³, 万浩华^{1,2}, 陈 飞¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国人民解放军 96901 部队, 北京 100095)

摘 要: 双光子吸收碱金属蒸汽激光器 (TPAL) 在基础研究和国防工程中有重要的应用前景, 近些年来已成为激光领域研究热点之一, 但 TPAL 还缺少相关的理论模型。因此, 本文基于碱金属原子的双光子吸收能级跃迁过程构建速率方程, 并建立了 TPAL 理论模型, 研究了单波长泵浦双光子吸收铷蒸汽激光器 (Rb-TPAL) 的工作特性, 分析了泵浦光束腰位置、蒸汽池温度以及泵浦功率对 Rb-TPAL 蓝光输出特性的影响。结果表明, 通过优化泵浦光束腰位置和蒸汽池温度, 在高功率泵浦情况下, Rb-TPAL 可获得高功率蓝光激光输出。

关键词: 碱金属蒸汽激光器; 双光子吸收; 红外激光; 蓝光; 速率方程

中图分类号: TN248.2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210290

Analysis on performance of two-photon Rb vapor laser

Ji Yanhui^{1,2}, He Yang¹, Lao Guochao³, Wan Haohua^{1,2}, Chen Fei¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics

and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Unit 96901 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100095, China)

Abstract: Two-photon absorbing alkali vapor laser (TPAL) has important application prospects in basic research and defense engineering, and has become one of the research hotspots in the laser field in recent years. However, TPAL still lacks relevant theoretical models. The operating characteristics of a single-wavelength pumped two-photon absorbing rubidium vapor laser (Rb-TPAL) are investigated, and the effects of pump beam waist position, vapor cell temperature and pump power on the blue light output characteristics of Rb-TPAL are analyzed. The results show that the optimal pump beam waist position and vapor cell temperature exist for the Rb-TPAL to output the highest power blue laser. By optimizing the pump beam waist position and vapor cell temperature, the Rb-TPAL can obtain high power blue laser output under high power pumping.

Key words: alkali vapor laser, two-photon absorption, infrared laser, blue laser, rate equation

基于双光子吸收的碱金属蒸汽激光器 (TPAL) 可将碱金属原子激发到更高的能级, 借助中间能级实现蓝光和中红外光多波段同轴输出, 在光电对抗、激光制导、原子物理、激光显示、量子信息科学及激光水下通信与探测等领域有广阔的应用前景^[1-6], 是近年来的研究热点。TPAL 分为单波长和双波长两种泵浦方式, 其中, 单波长泵浦 TPAL 利用单一波长泵浦光通过双光子吸收的方式激励碱金属原子跃迁到相应的高能级, 泵浦光的波长对应于基态与高能级跃迁波长的 2 倍。相比于双波长泵浦, 单波长泵浦 TPAL 省去泵浦光路合束的复杂性, 结构较为简单。

早在 1962 年哥伦比亚大学的 Abella 首次观察到铯原子从 $6S_{1/2}$ 到 $9D_{3/2}$ 的双光子吸收过程^[7], 1978 年, Harting 课题组首次通过钠原子双光子过程获得 $2.34 \mu\text{m}$ 中红外光和 320 nm 紫外光输出^[8]。受限于泵浦源以及相关的探测设备, TPAL 进展缓慢, 研究成果主要停留在双光子吸收特性、频率转换特性以及能量转移等方面。21 世纪以来, 随着窄线宽、高功率激光器的发展, TPAL 得以进行深入的实验研究, 对其泵浦方式, 运行参数以及谐振腔进行优

* 收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61975203, 62005274); 激光与物质相互作用国家重点实验室开放基金项目 (SKLLIM2012)

联系方式: 季艳慧, jiyanhui18@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 陈 飞, feicheny@126.com。

化,使双光子过程不限于脉冲泵浦以及低输出功率的情况。2010年, Vernier 课题组通过双光子吸收泵浦,在 Rb 蒸汽 TPAL(Rb-TPAL)中实现了 2.6% 的转换效率^[9]; 2014 年,美国空军学院的 Sell 等对双波长分步跃迁泵浦 Rb-TPAL 输出的相干蓝光进行研究,产生蓝光功率为 9.1 mW,效率为 1.5%^[10],这是目前 Rb-TPAL 连续出光功率最高的报道; 2017 年, Brekke 课题组在单波长泵浦的 Rb-TPAL 中采用环形腔结构,相对于无腔结构输出功率提高 50 倍^[11]。同时国内也对 TPAL 开展一系列实验研究,中国科学院大连化学物理研究所利用单波长染料激光器泵浦 Rb-TPAL,得到能量转换效率超过 1% 的脉冲蓝光,并发现 2.42 μm 中红外光可以实现对输出蓝光波长起到调控和选择作用^[12-13]; 山西大学采用“bow-tie-type”环形腔使 Rb-TPAL 实现 3.3 mW 的蓝光稳定连续输出^[14]。

但目前关于 TPAL 的理论研究较少,前期本课题组在双光子吸收碱金属蒸汽激光器理论方面做了初步研究,利用耦合波方程组计算出双光子吸收截面以及泵浦阈值^[15-16],但还缺少对 TPAL 输出特性进行仿真的理论模型。因此,本文基于双光子吸收产生蓝光的速率方程建立 TPAL 理论模型,以单波长泵浦 Rb-TPAL 为研究对象,模拟泵浦束腰位置、蒸汽池内温度和泵浦功率对 TPAL 蓝光输出功率的影响。

1 单波长泵浦 Rb-TPAL 理论模型

以 Rb 原子为例,图 1 为 Rb 原子在单波长泵浦情况下的双光子吸收过程跃迁能级图, $5^2S_{1/2}$ 为基态能级, $5^2D_{5/2}$ 和 $6^2P_{1/2}$ 分别是泵浦上能级与激光上能级, $|i\rangle$ 表示与 $5^2P_{3/2}$ 间距为 1THz 的虚能级是由非线性效应造成共振吸收所虚构的中间能级。基态的 Rb 原子借助中间虚能级 $|i\rangle$ 吸收两个波长为 778.1 nm 光子跃迁到 $5^2D_{5/2}$ 能级,和 $6^2P_{3/2}$ 能级之间形成反转,由于 $5^2S_{1/2}$ 到 $5^2D_{5/2}$ 跃迁的双光子吸收截面比 $5^2S_{1/2}$ 到 $5^2D_{3/2}$ 跃迁的双光子吸收截面大约 26 倍^[15],因此只考虑前者的路径。处于高能级 $5^2D_{5/2}$ 的 Rb 原子会通过自发辐射的方式发射一个波长为 5.23 μm 的光子到 $6^2P_{3/2}$ 能级,由于普通蒸汽池窗口材料对 5.23 μm 红外光的强烈吸收^[17-18]。因此,该模型未考虑 $5^2D_{5/2}$ 至 $6^2P_{3/2}$ 跃迁对应的受激辐射,仅考虑 $5^2D_{5/2}$ 至 $6^2P_{3/2}$ 的自发辐射。激光上能级 $6^2P_{3/2}$ 跃迁到基态 $5^2S_{1/2}$ 的过程会产生一个波长 420 nm 的蓝光激光光子。

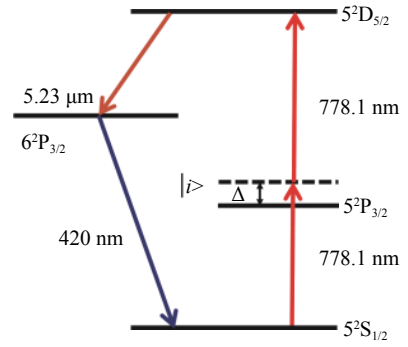


Fig. 1 Energy levels of Rb atom
图 1 铷原子能级跃迁图

由此建立单波长泵浦 Rb-TPAL 的速率方程为

$$\begin{aligned} \frac{dn_1}{dt} &= \frac{-n_1\sigma_{13}I_p^2}{h\nu_p} + \frac{(n_2 - 2n_1)\sigma_{21}I_L}{h\nu_{UV}} + n_3A_{31} + n_2A_{21} \\ \frac{dn_2}{dt} &= \frac{-(n_2 - 2n_1)\sigma_{21}I_L}{h\nu_{UV}} - n_2A_{21} + n_3A_{32} \\ \frac{dn_3}{dt} &= \frac{n_1\sigma_{13}I_p^2}{h\nu_p} - n_3A_{32} - n_3A_{31} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: n_1 , n_2 和 n_3 分别为基态($5^2S_{1/2}$)、激光上能级($6^2P_{3/2}$)和泵浦上能级($5^2D_{5/2}$)的粒子数密度; σ_{13} 为双光子吸收截面; I_L 为激光总光强; h 为波尔兹曼常数; A_{31} , A_{21} 分别为 $5^2D_{5/2}$ 与 $6^2P_{3/2}$ 上的自发辐射速率; A_{32} 为 $5^2D_{5/2}$ 到 $6^2P_{3/2}$ 间的自发辐射速率; ν_{UV} 为蓝光激光频率; ν_p 为泵浦光频率; I_p 为泵浦光总强度; σ_{21} 为激光发射截面。

σ_{TPT} 为利用耦合波方程组计算出的双光子吸收截面^[15], 单位为 cm^4/W , 表达式如下

$$\sigma_{TPT} = \frac{3 \cdot (2\pi \cdot \nu_p)^3}{k_p^2 c^2 N} \mu_0 \text{Im}[\chi^{(3)}(-\nu_{UV}, \nu_p, \nu_p, -\nu_{IR})] \times S_{FF} \times f_{iso} \times f_F \quad (2)$$

式中: ν_p , ν_{IR} 分别是泵浦光以及中红外光的频率; k_p 是泵浦光波数; c 为真空中光速; μ_0 为真空磁通量; $\text{Im}[\chi^{(3)}]$ 是单波长泵浦下三阶极化率的虚部; f_{iso} 为同位素丰富度, 对于 Rb 原子, $f_{iso}(\text{Rb}^{85})=72.2\%$, $f_{iso}(\text{Rb}^{87})=27.8\%$; S_{FF} 是超精细相对强度; f_F 为粒子数统计分布, 表示粒子数在 $5^2S_{1/2}$ 能级 F 超精细能级上的粒子分布比例。其他的计算参数见表 1。

激光器运转时满足粒子数守恒条件

表 1 模型中使用参数

Table 1 Parameters used in the model

two-photon absorption cross section $\sigma_{\text{TP}}(\text{cm}^4/\text{W})$	stimulated absorption cross section σ_{13}	pump central wavelength λ_p/nm	laser central wavelength λ_l/nm	$6^2\text{P}_{3/2}-5^2\text{S}_{1/2}$ spontaneous emission rate A_{21}	$5^2\text{D}_{5/2}-5^2\text{S}_{1/2}$ spontaneous emission rate A_{31}/s	$5^2\text{D}_{5/2}-6^2\text{P}_{3/2}$ spontaneous emission rate A_{32}/s
$1.4 \times 10^{-19[15]}$	defined $I_p \times \sigma_{\text{TP}}$	778.1	420	$2.81 \times 10^6 \text{ s}$	4.31×10^6	1.43×10^6

$$n_1 + n_2 + n_3 = n_{\text{tot}} \quad (3)$$

式中： n_{tot} 表示蒸汽池中铷原子的密度，是关于温度的函数，可表示

$$n_{\text{tot}} = 133.322 \times 10^{2.881+4.312-\frac{4040}{T}} / kT \quad (4)$$

以端面泵浦，Rb-TPAL 为例进行仿真分析，系统示意图如图 2 所示， z 坐标轴平行于泵浦光和激光光轴，以蒸汽池中心为坐标原点，靠近输入镜方向为负，靠近输出镜方向为正。泵浦源选择波长为 778.1 nm 的半导体激光器(LD)。从光纤输出的泵浦光经过聚焦镜 L_1 进行准直，再经过 L_2 聚焦进入谐振腔内(由平面镜 M_1 和 M_2 组成)的 Rb 蒸汽池中，通过谐振腔的振荡实现 420 nm 的蓝光连续激光输出。稳态情况下，粒子数密度不随时间变化，方程(1)等于零，则可解出各能级粒子数密度和泵浦光强以及激光光强的变化关系，进而求出谐振腔内蓝光激光强度分布。

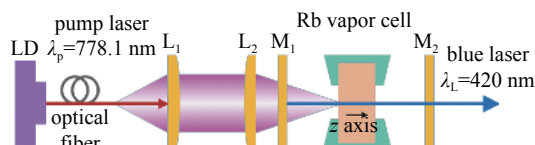


Fig. 2 Schematic of Rb-TPAL system

图 2 Rb-TPAL 系统示意图

2 单波长泵浦 Rb-TPAL 仿真

2.1 泵浦光束腰位置影响

首先分析 LD 泵浦情况下，泵浦光束腰位置对 Rb-TPAL 蓝光输出功率的影响。以蒸汽池中心为坐标原点，以 z 轴为坐标轴，靠近输入镜方向为负，靠近输出镜方向为正。模拟条件为：泵浦光入射功率 100 W，蒸汽池工作温度 200 °C，蒸汽池长度为 2 cm，蒸汽池两侧窗口在 420 nm 处的透过率为 90%，输出镜反射率为 10%，蒸汽池位于谐振腔中心。图 3 为蓝光输出功率随泵浦光束腰位置变化关系，可见，随着泵浦光束腰向蒸汽池中心移动，蓝光功率逐渐增大，当泵浦光束腰位于蒸汽池中心位置时，蓝光输出功率最大，随着泵浦光束腰继续向输出镜移动时，激光输出功率逐渐下降。结果表明，泵浦光束腰位置对蓝光输出功率有重要影响，当泵浦光束腰位于蒸汽池中心位置时光束质量较好，可以实现最佳的模式匹配，蓝光输出功率最高。因此实验中应尽量使泵浦光束腰位置满足模式匹配条件，以提高 Rb-TPAL 得到较大的蓝光转换效率。

2.2 蒸汽池温度影响

由公式(4)可以看出，蒸汽池温度主要影响蒸汽池内碱金属原子浓度，进而影响 Rb-TPAL 的蓝光输出功率。图 4(a)给出不同泵浦功率条件下，蓝光输出功率随温度的变化，可见，温度较低时，蓝光输出功率随碱金属蒸汽温度的增加近似线性增长，但随着温度的继续增加，蓝光输出功率在达到峰值后开始下降，因此，存在一个最佳的温度使 Rb-TPAL 获得最高的蓝光输出功率，且泵浦功率越高，最佳温度越高，对应的蓝光输出功率也越高，当泵浦功率为 100, 200, 300 W 时，最佳温度别为 180, 200, 210 °C，对应的输出功率分别为 0.077, 4.267, 8.855 W。图 4(b)给出泵浦入射功率为 100 W 的情况下，稳态时蒸汽池内蓝光增益系数分布，由此可见存在最佳温度的原因：当温度低于 180 °C 时，随着温度升高，Rb 原子浓度增大，蓝光获得的增益较高，因此此时蓝光功率随工作温度的上升而增加。当工作温度超过 180 °C 时，此时的 Rb 原子粒子数浓度过高，导致泵浦光能量在蒸汽池前端($z < 0.5 \text{ cm}$)被充分地吸收，蓝光增益也较高，到蒸汽池后端($z > 0.5 \text{ cm}$)，由于泵浦光被充分吸收后功率迅速下降，使 Rb 原子无法吸收足够的泵浦光至激发态，蓝光增益由正值变为负值，Rb 蒸汽反而对蓝光形成吸收损耗，最终造成蓝光输出功率随着工作温度的增加而下降。

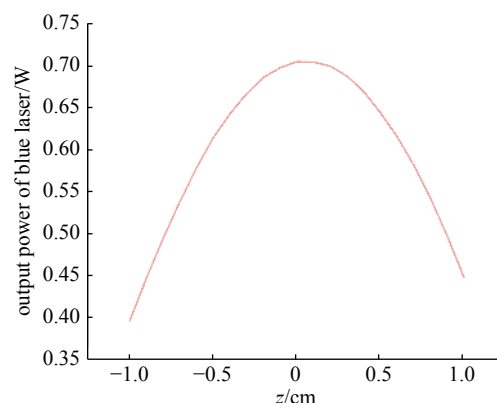


Fig. 3 Output power of blue laser as function of the position of waist

图 3 蓝光输出功率随泵浦光束腰位置变化

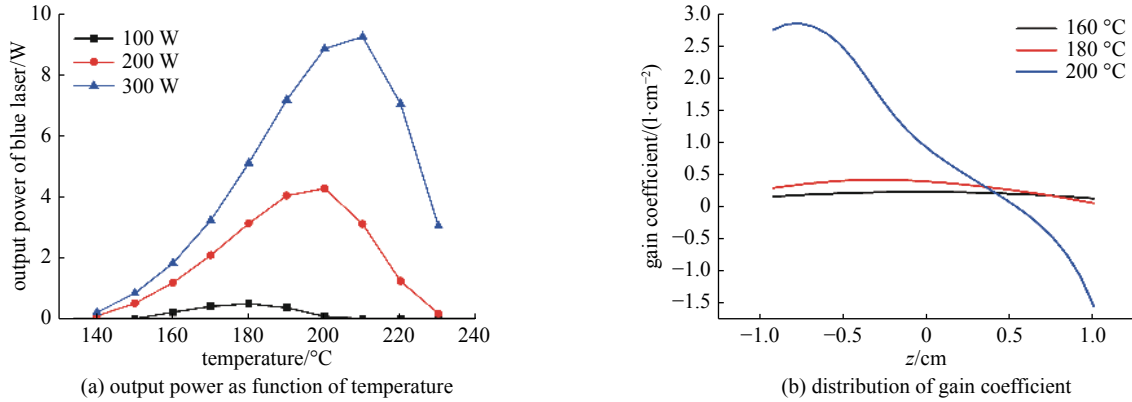


Fig. 4 Influence of pump power and temperature on output power and gain coefficient in the vapor cell

图4 泵浦功率与蒸汽池内温度对输出功率和蒸汽池内增益系数的影响

2.3 泵浦功率影响

最后对高功率泵浦情况下 Rb-TPAL 蓝光输出特性进行仿真, 泵浦光束腰位于蒸汽池中心, 蒸汽池温度 200 °C, 其他模拟条件与上文一致。图 5(a) 为蓝光输出功率随输入功率的关系图, 可见, 泵浦功率阈值为 72 W, 相应的泵浦强度阈值为 $9.1673 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 。达到阈值后, 随着泵浦功率的增加, Rb-TPAL 的蓝光输出功率保持线性增长。当泵浦功率为 1000 W 时, 输出功率可达 47.16 W。图 5(b) 给出了泵浦光剩余功率在蒸汽池内的分布, 得到光光转换效率以及废热比分别是 7.04% 和 92.96%。图 5(c) 为泵浦功率 1000 W 情况下, 蒸汽池内各能级粒子数分布图, 可见, 稳态情况下泵浦上能级 $5^2D_{5/2}$ 粒子数 n_3 远大于激光上能级 $6^2P_{3/2}$ 粒子数 n_2 以及基态 $5^2S_{1/2}$ 粒子数 n_1 。这是因为高功率泵浦情况下, Rb 原子在吸收泵浦光后大量跃迁至 $5^2D_{5/2}$ 能级, 而 $5^2D_{5/2}$ 到 $6^2P_{3/2}$ 间的自发辐射速率较小, 无法使泵浦上能级粒子数跃迁到激光上能级, 造成蓝光输出功率较低。通过引入 5.23 μm 的中红外光有望提高 $5^2D_{5/2}$ 到 $6^2P_{3/2}$ 的跃迁速率, 不仅提高蓝光输出功率, 还能对中红外光进行放大, 通过引入中红外光调控蓝光输出功率的方法已在实验上得到验证^[13], 在后续研究中拟仿真分析中红外光调控 TPAL 蓝光输出的作用机理。

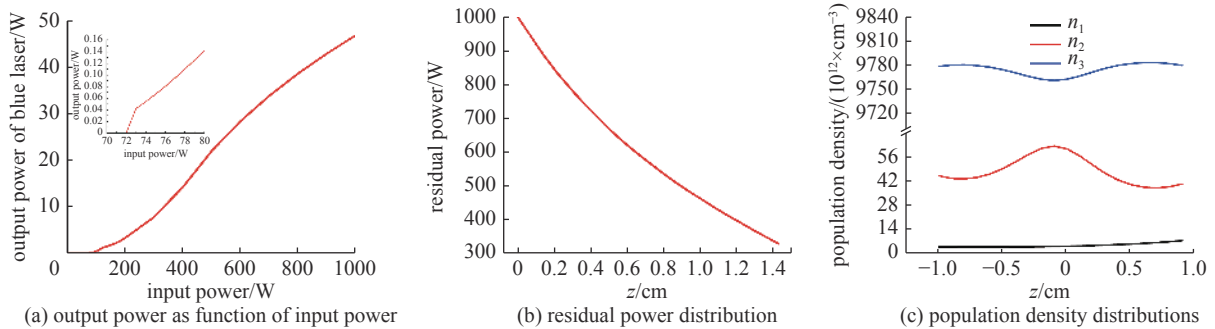


Fig. 5 Output power as function of input power and distribution of residual power and population densities in the vapor cell at steady state

图5 泵浦功率对输出功率的影响以及蒸汽池内剩余功率和粒子数密度分布

3 结论

本文利用速率方程构建了单波长泵浦 Rb-TPAL 理论模型, 分析了泵浦光束腰位置、蒸汽池温度和泵浦功率对 Rb-TPAL 蓝光输出特性的影响。仿真结果表明: 泵浦光束腰位置会影响 Rb-TPAL 的模式匹配, 存在最佳的泵浦光束腰位置以达到最佳的模式匹配条件, 从而获得高效率蓝光输出; 蒸汽池温度主要影响 Rb 蒸汽的粒子数浓度, 进而影响泵浦光的吸收和蓝光的增益, 存在一个最佳温度, 既保证泵浦光在蒸汽池内得到充分吸收, 又防止 Rb 原子对蓝光形成再吸收, 从而使 Rb-TPAL 获得最大功率的蓝光输出; 最后对高功率泵浦情况 Rb-TPAL 的蓝光输出特性进行仿真, 在最高 1000 W 泵浦情况下, 蓝光激光输出功率可达到 47.16 W, 但光光效率仅为 7.04%, 可通过引入 5.23 μm 中红外光有望提高蓝光的效率。该理论模型可为高功率 Rb-TPAL 的实验研究提供理论依据。

参考文献:

- [1] Shimoda R, Sakata Y, Fujise T, et al. The adenoma miss rate of blue-laser imaging vs white-light imaging during colonoscopy: A randomized tandem trial[J]. Endoscopy, 2017, 49(2): 186-190.

- [2] 汪鑫, 杜辉, 王兆港, 等. 基于激光光源的4K超高清 DLP 投影光学引擎的设计[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(2): 14-19. (Wang Xin, Du Hui, Wang Zhaogang, et al. Design of 4K UHD DLP optical engine based on laser light source[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2017, 15(2): 14-19)
- [3] Chen M F, Ho Y S, Chung C K, et al. Examination of the developed scanning system for red-green-blue laser projector with a feedback control[J]. *Optical Review*, 2011, 18(1): 128-131.
- [4] Ye J, Kimble H J, Katori H. Quantum state engineering and precision metrology using state-insensitive light traps[J]. *Science*, 2008, 320(5884): 1734-1738.
- [5] Boyer V, Marino A M, Pooser R C, et al. Entangled images from four-wave mixing[J]. *Science*, 2008, 321(5888): 544-547.
- [6] Radnaev A G, Dudin Y O, Zhao R, et al. A quantum memory with telecom-wavelength conversion[J]. *Nature Physics*, 2010, 6(11): 894-899.
- [7] Abella I D. Optical double-photon absorption in cesium vapor[J]. *Physical Review Letters*, 1962, 9(11): 453-455.
- [8] Hartig W. Two-photon resonant four-wave mixing in atomic sodium vapour[J]. *Applied Physics*, 1978, 15(4): 427-432.
- [9] Vernier A, Franke-Arnold S, Riis E, et al. Enhanced frequency up-conversion in Rb vapor[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 17020-17026.
- [10] Sell J F, Gearba M A, DePaola B D, et al. Collimated blue and infrared beams generated by two-photon excitation in Rb vapor[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 528-531.
- [11] Brekke E, Potier S. Optical cavity for enhanced parametric four-wave mixing in rubidium[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(1): 46-49.
- [12] 曹睿. 双光子泵浦碱金属蓝光研究[D]. 长春理工大学: 2015. (Cao Rui. Experimental research on two-photon pumped alkali metal blue light[D]. Changchun University of Science and Technology, 2015)
- [13] Gai B, Cao R, Xia X, et al. Modulation of a double-line frequency up-conversion process in cesium vapor[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(6): 1-7.
- [14] Yuan J, Liu H, Wang L, et al. Coherent 420 nm light generated by the cavity-enhanced four-wave mixing process in Rb vapor[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 4858-4865.
- [15] Yu H, Chen F, He Y, et al. Theoretical modeling and analysis on the absorption cross section of the two-photon excitation in Rb[J]. *Optics express*, 2018, 26(13): 17254-17263.
- [16] Yu H, Chen F, Pan Q, et al. Modeling and analysis of the pumping threshold characteristics in one-color two-photon excited Cs vapor[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, 56(2): 1-6.
- [17] Akulshin A M, Budker D, McLean R J. Parametric wave mixing enhanced by velocity-insensitive two-photon excitation in Rb vapor[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(5): 1016-1022.
- [18] Offer R F, Conway J W C, Riis E, et al. Cavity-enhanced frequency up-conversion in rubidium vapor[J]. *Optics letters*, 2016, 41(10): 2177-2180.